



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Bestemmelse af forbelastningstryk i laboratoriet

Jacobsen, H. Moust

*Published in:*

NGM-92 : Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde, Aalborg, 28-30 Maj 1992

*Publication date:*

1992

*Document Version*

Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Jacobsen, H. M. (1992). Bestemmelse af forbelastningstryk i laboratoriet. I *NGM-92 : Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde, Aalborg, 28-30 Maj 1992: Artikler til NGM-92: Session 5-8* (Bind 2/3, s. 455-460). Dansk Geoteknisk Forening. DGF-bulletin Nr. 9

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

MB7.

# NGM-92

11. NORDISKE GEOTEKNIKERMØDE

AALBORG, 28-30 MAJ 1992

## Vol 2 / 3

Artikler til NGM-92: Session 5-8

Maj 1992  
dgf-Bulletin

9



DANISH GEOTECHNICAL SOCIETY  
DANSK GEOTEKNISK FORENING

# **NGM-92**

11. NORDISKE GEOTEKNIKERMØDE  
AALBORG, 28-30 MAJ 1992

**Vol 2 / 3**

Artikler til NGM-92: Session 5-8

Maj 1992  
dgt-Bulletin

**9**



**DANISH GEOTECHNICAL SOCIETY  
DANSK GEOTEKNISK FORENING**

# Bestemmelse af forbelastningstryk i laboratoriet

Af

H. Moust Jacobsen, Aalborg Universitetscenter

## RESUME

De foreliggende metoder til bestemmelse af forbelastningstrykket  $\sigma'_{pc}$  i konsolideringsforsøg omtales, vurderes og sammenlignes.

## INDLEDNING

Belastes en lerprøve op til eller ud over forbelastningstrykket  $\sigma'_{pc}$ , iagttages en kraftig forøgelse af krybningen ("sekundær konsolidering"), og der sker et drastisk fald i konsolideringsmodulet  $K$ . Den samlede virkning heraf omtales af Roscoe (1963) som "yielding". Det er naturligvis vigtigt at kunne bestemme  $\sigma'_{pc}$ , og derved blive i stand til at rekonstruere spændingshistorien i laboratorieforsøg og tage "yielding" i betragtning ved sætningsberegninger.

## PRIMÆRGRENEN

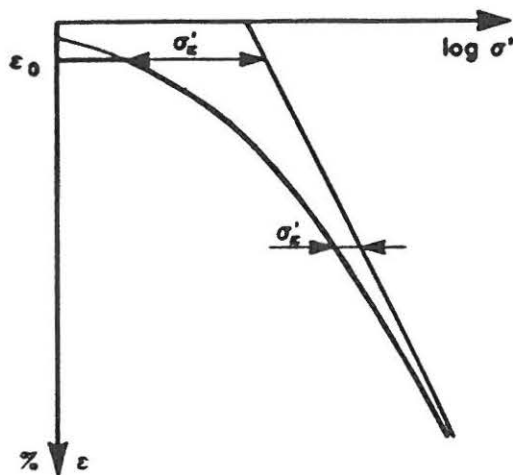
I et konsolideringsforsøg observeres først den såkaldte primærgren, der i logaritmisk afbildning er jævnt krum og for store spændinger har en asymptote, stamkurven, der beskriver en normalkonsolideret tilstand. Primærgrenens udseende antages ofte forårsaget af dårlig prøvetildannelse, men selv med de bedst tildannede prøver måles en krum primærgren. Krumningen skyldes da også, at spændingstilstanden ændres fra isotrop tilstand til hviletrykstilstand.

Det er primærgrenens krumning eller ændring af krybningen, der normalt danner grundlag for bestemmelse af  $\sigma'_{pc}$ .

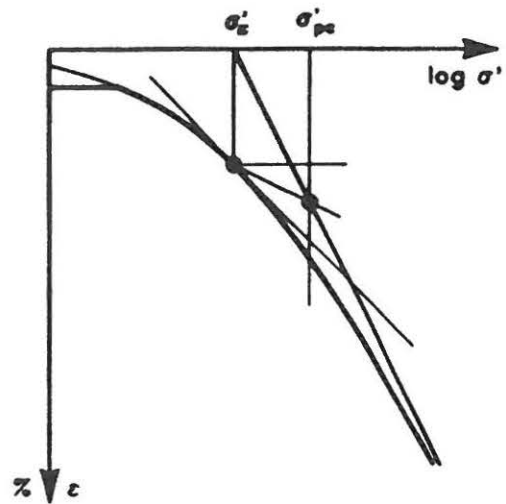
En primærgren kan beskrives ved formlen:

$$\epsilon = Q \log \left( 1 + \frac{\sigma'}{\sigma'_\kappa} \right) + \epsilon_0 \quad (1)$$

hvor  $Q$  er tøjningsindex og  $\sigma'_\kappa$  er en referencespænding, der gør udtrykket under logaritmetegnet dimensionsløst.  $\epsilon_0$  er den tøjning, der svarer til poreundertrykket ved prøvetildannelsen. Referencespændingen  $\sigma'_\kappa$  kan ses at være det tillæg til  $\sigma'$ , der gør primærgrenen



Figur 1: Terzaghis konstruktion af asymptote, svarende til normalt konsolideret tilstand.



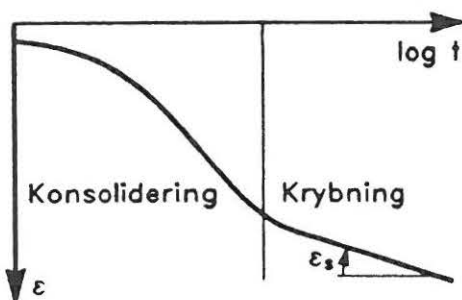
Figur 2: Casagrandes konstruktion af forbelastningstryk  $\sigma'_{pc}$ , anvendt på Terzaghis kurve (fig. 1).

logaritmisk (Fig. 1). Det er allerede foreslået af Terzaghi, og det er i god overensstemmelse med næsten alle primærkurver.

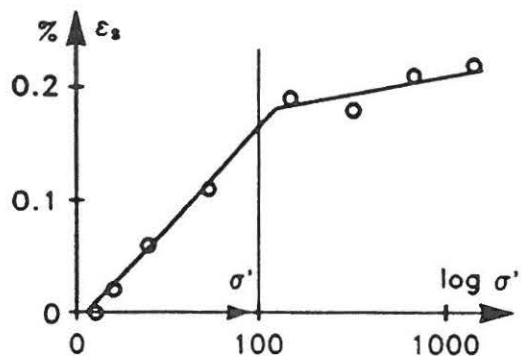
Casagrandes metode er langt den mest anvendte til bestemmelse af  $\sigma'_{pc}$  og kan selvfølgelig også bruges på Terzaghis primærgren (Fig. 2). Man skal da først opsøge punktet med mindst krumningsradius. Ud fra formel (1) kan beregnes, at krumningsradius er mindst for  $\sigma' = \sigma'_x$ , svarende til  $\epsilon = Q \log 2$ . Tangenten til kurven i dette punkt har ifølge formel (1) hældningen  $0.5 Q$ . Vinkelhalveringslinien får altså hældningen  $0.25 Q$ . Idet asymptoten er  $\epsilon = Q \log (\sigma' / \sigma'_x) + \epsilon_0$ , fås:

$$\sigma'_{pc} \approx 2.5 \sigma'_x \quad (2)$$

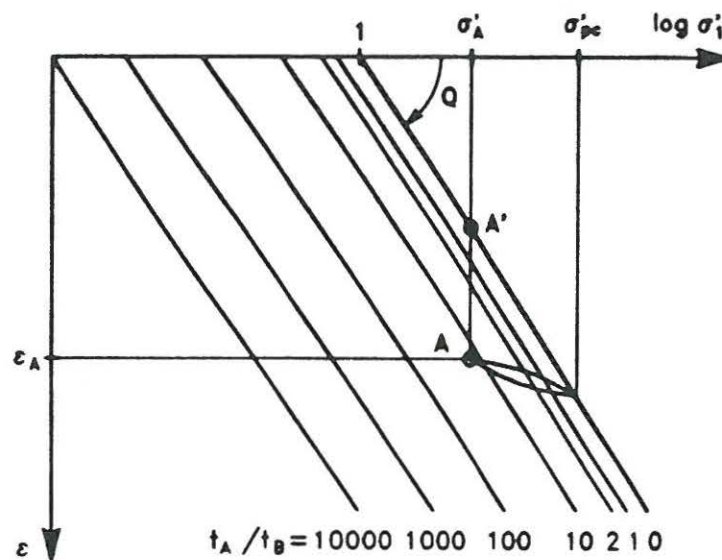
Man kan altså finde  $\sigma'_{pc}$  efter Casagrandes metode ved at finde  $\sigma'_x$  først. Der ses dog bort fra de første punkter, da  $\sigma'_x$  ellers bestemmes for stor. Man behøver således ikke at gætte, hvor på kurven krumningen er størst, eller hvor asymptoten ligger. Den normale fremgangsmåde reducerer faktoren 2.5 i formel (2) væsentligt, fordi asymptoten lægges for tæt på primærgrenen, og punktet med størst krumning let lægges ved for lille tøjning.



Figur 3: Opdeling i konsolideringsfase og krybningsfase.



Figur 4: Akais metode til bestemmelse af  $\sigma'_{pc}$ .



Figur 5: Stamkurve og krybningsisokroner.

## KRYBNING

Det er velkendt, at krybningens dekadehældning  $\epsilon_s$  vokser drastisk, når  $\sigma' \rightarrow \sigma'_{pc}$ . Dette har været anvendt af Akai (1960). En tidskurve deles da op i en konsolideringsfase og en krybningsfase (Fig. 3). Krybningen antages at være logaritmisk afhængig af  $t$  med dekadehældningen  $\epsilon_s$ . Der ses altså bort fra eventuelle krumme krybningskurver. Akai fandt, at  $\epsilon_s$  vokser proportionalt med  $\sigma'$ , når  $\sigma' < \sigma'_{pc}$  og med  $\log \sigma'$ , når  $\sigma' > \sigma'_{pc}$ . Herved kan  $\sigma'_{pc}$  bestemmes (Fig. 4). Metoden er kun brugbar ved lange tidskurver. Ellers bliver  $\epsilon_s$  let overvurderet.  $\epsilon_s$  er i øvrigt ofte konstant, når  $\sigma'_{pc}$  overskrides.

## SAMTIDIG KONSOLIDERING OG KRYBNING

Allerede i 1961 fremkom Brinch Hansen med sin teori om samtidigt forløbende konsolidering og krybning. I 1967 foreslog Bjerrum, at man forenkler det teoretiske grundlag ved først at antage konsolideringen for momentan. En arbejdskurve kan altså gennemløbes til tiden  $t = 0$ . På figur 5 ses stamkurven til en normalkonsolideret ler, der til tiden  $t = 0$  har en spændings- tøjningstilstand, der svarer til punkt A'. Krybningen finder nu sted, idet  $\sigma'$  er konstant. Den antages at forløbe efter formlen

$$\epsilon_{cr} = Q_s \log \left( 1 + \frac{t_r}{t_b} \right) \quad (3)$$

idet  $Q_s$  antages konstant for en normalkonsolideret ler.  $t_b$  er en referencetid, og  $t_r$  er den reelt forløbne tid. Kurver gennem punkter, der har krøbet lige længe, er linier parallelle med  $t = 0$  kurven (stamkurven). De kaldes i det følgende for krybningsisokroner (Fig. 5).



Referencetiden  $t_b$  har betydning for den relative afstand mellem isokronerne i nærheden af  $t = 0$  kurven. Disse isokroner dækkes imidlertid af konsolideringsprocessen, og  $t_b$  må derfor skønnes, fx til et minut.

Når krybningen har fundet sted i en periode  $t_A$ , er punkt A nået. Belastet herfra vil leret optræde med en forbelastning  $\sigma'_{pc}$ , der er større end  $\sigma'_A$ . I praksis vil en normalkonsolideret ler derfor have en forbelastningsspænding, der er større end det lodrette in situ tryk, i nøje overensstemmelse med praktisk erfaring.

Gives prøven en lille spændingstilvækst  $d\sigma$  fra punkt A, vil krybningen fortsætte som før, men den observerede tid  $t$  skal nu lægges til  $t_A$  for at få den reelle tid  $t_r$ . Herved fås:

$$\Delta\epsilon_{cr} = Q_s \left( \log \left( 1 + \frac{t + t_A}{t_b} \right) - \log \left( 1 + \frac{t_A}{t_b} \right) \right) \cong Q_s \log \left( 1 + \frac{t}{t_A} \right) \text{ for } t_A \gg t_b \quad (4)$$

$t_A$  kaldes for prøvens tilsyneladende alder. For en normalkonsolideret ler er det prøvens geologiske alder ved optagning, men såfremt prøven belastes, bliver  $t_A$  reduceret, og  $t_A$  vil være meget lille i en normalkonsolideret tilstand. Krybningsisokronerne betragtes som niveaukurver for  $t_A$ , idet det stemmer for punkt A med lille genbelastning og for normalkonsolidering hvor  $t_A \approx 0$ .

Under en normal genbelastning vil genbelastningskurven krydse en række krybningsisokroner, og  $t_A$  vil altså variere. For nemheds skyld antages det, at  $t_A$  straks antager sin slutværdi. Er formel (4) korrekt, og den sidst gjorte antagelse rimelig, kan man for normalkonsoliderede eller lettere forbelastede lerarter finde følgende:

$Q_s$  findes som den største værdi af  $\epsilon_s$ , der måles, idet der dog ikke anvendes tidskurver med belastninger, der er væsentlig større end  $\sigma'_{pc}$ .

Derefter kan  $t_A$  findes af enhver krybningskurve. Til sidst kan punkter på stamkurven beregnes – stamkurven fastlægges herved med stor præcision (Fig. 6).

Hvis det er rimeligt at anvende formel (4) under hele tidsforløbet, vil konsolideringsfasens tøjninger let kunne udregnes. En yderligere kontrol vil da være, at tøjningsudviklingen i konsolideringsfasen følger den klassiske teori.

## KONSOLIDERING

Konsolideringens tidsforløb kan angives ved følgende udtryk (Brinch Hansen 1961):

$$U^{-6} = 1 + \frac{1}{2} T^{-3} \quad (5)$$

hvor  $U$  er konsolideringsgrad og  $T$  er en tidsfaktor.  $T/t = c_k/H^2$  hvor  $c_k = kK/\gamma w$ . Udtrykket er tilnærmet, men den maksimale fejl er højst et par procent.

Med numeriske beregninger (finite differencer) har Mogens Jørgensen (1991) studeret forløbet, såfremt  $c_k$  varierer. Såfremt  $c_k$  varierer springvis fra en konstant værdi til en anden konstant værdi, svarende til at  $\sigma'$  passerer  $\sigma'_{pc}$  under tidsforløbet, og yielding opstår i den afsluttende del af konsolideringsfasen, får tidskurven et knæk, som ikke optræder ved jævn variation af  $c_k$ . På tidskurven kan findes to konsolideringstider  $T_I$  og  $T_{II}$  og to begyndelses-konsolideringsgrader  $U_I \approx 0$  og  $U_{II}$ . Af forholdet  $T_I/T_{II}$  og  $U_{II}$  kan bestemmes  $\sigma'_{pc}$ , samt forholdet mellem de to  $c_k$ -værdier. Da gennemsnitskonsolideringsmodulet  $K$  kendes, kan

også de to  $c_k$ -værdier bestemmes. Antages permeabilitetskoefficienten at være konstant under belastningstrinnet, kan  $K_{pc}$  og  $K_{nc}$  findes.

Man kan altså i visse tilfælde finde  $\sigma'_{pc}$  af en tidskurve.

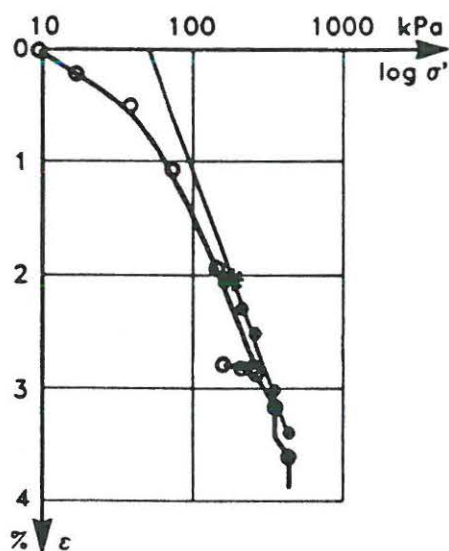
Det er dog ikke problemfrit, blandt andet fordi mange tidskurver ser ud til at have et knæpunkt. Følgende forudsætning skal være opfyldt:

- i) Den sandsynlige værdi af  $\sigma'_{pc}$  skal ligge indenfor det aktuelle spændingsinterval.
  - ii) Værdierne af konsolideringsmodulet for normalkonsolideret ler  $K_{nc}$  og for forbelastet ler  $K_{pc}$  skal være rimelige.
  - iii) Da  $\sigma'_{pc}$  er fundet efter fradrag af krybning, skal det beregnede forbelastningspunkt ligge på stamkurven.
  - iv) Knæpunktets konsolideringsgrad  $U_K$  skal svare til  $0.15 < U_K < 0.85$ .
- Specielt ii) medfører en stor sikkerhed for, at det opnåede resultat er rimeligt.

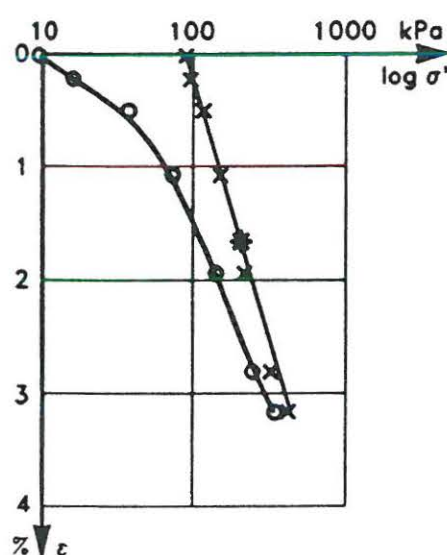
### EKSEMPEL

Figur 6 og 7 viser et forsøgsresultat med en moræneler, hvor der kun er udført en mindre af- og genbelastning. Ved brug af Casagrandes metode – i den omtalte modificerede form – findes  $\sigma'_k$  først til 80 kPa, hvorefter  $\sigma'_{pc}$  bliver 200 kPa. De første tidskurver er så korte, at krybningen ikke kan findes med sikkerhed. De 5 sidste tidskurver er derimod benyttet til at finde stamkurven. Her ligger også et forbelastningspunkt, bestemt ud fra en tidskurve.  $\sigma'_{pc} = 182$  kPa.

Akai's metode er ikke altid velegnet, og  $\sigma'_{pc}$  bliver mere usikkert bestemt end ved de øvrige metoder. Resultatet, der er vist på figur 4, stammer også fra et forsøg på moræneler.



Figur 6: Samme forsøg som figur 7.  $t = 0$  kurven er bestemt ved krybningsgrene. \* Forbelastningstryk  $\sigma'_{pc} = 182$  kPa fundet på tidskurve.



Figur 7: Forsøg på moræneler. \* Casagrandes metode.  $\sigma'_k = 80$  kPa.  $\sigma'_{pc} = 200$  kPa.



## KONKLUSION

Der er angivet to metoder til at bestemme  $\sigma'_{pc}$ , og det viser sig, at de stemmer rimeligt overens, således som det vises i eksemplet, og som mange andre forskningsresultater viser. Den ene metode er Casagrandes, der er gjort mere præcis ved at anvende en antagelse som Terzaghi gjorde. Den bygger alene på arbejdskurven. Den anden metode er nyudviklet og bygger på en adskillelse af samtidig forløbende konsolidering og krybning, samt en analyse af tidsforløb hvor  $\sigma'_{pc}$  overskrides.

Det bemærkes, at de to fremgangsmåder fører til forskellige stamkurver. Imidlertid er afvigelsen lille, når det tages i betragtning, hvor forskellige metoderne er. Casagrandes metode er derfor – med den nye modifikation – stadig en god måde til bedømmelse af  $\sigma'_{pc}$ .

## REFERENCER

- Akai, K. (1960): Die strukturellen Eigenschaften von Schluff. *Mitteilungen Heft 22*. Die Technische Hochschule, Aachen.
- Bjerrum, L. (1967): Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings. *Geotechnique 17*, p. 81 - 118.
- Brinch Hansen, J. (1961): A model law for simultaneous primary and secondary consolidation. *GIB 13*. Danish Geotechnical Institute.
- Casagrande, A. (1936): The determination of the preconsolidation pressure and its significance. *IICSMFE Cambridge*, Vol. 3, pp. 60-64.
- Jørgensen, M.B. (1992): Konsolideringsforløb med varierende konsolideringskoefficient. *NGM92*. Aalborg.
- Moust Jacobsen, H. (1970): Strength and deformation properties of preconsolidated moraine clay. *GIB 27*. Danish Geotechnical Institute.
- Moust Jacobsen, H. (1975): Nogle danske morænelerers styrke- og deformationsegenskaber. *NGM75* København.
- Moust Jacobsen, H. (1992): Karakteristiske belastningstilstande for moræneler. *NGM 92*. Aalborg.